

激光散斑技术与水工建筑物

李伯芹 沈星原

(水利水电科学研究院)

散斑干涉计量术是七十年代发展起来的一门新兴技术。当用激光照射物体表面时,其漫反射光相互干涉形成了随机分布的斑点,该斑点称为“散斑”(speckle)。散斑在六十年代初兴起的激光全息术中曾被作为相干噪声力求消除掉的。1968年, Burch 和 Tokavski 指出^[1],用全息底片将物体表面的随机分布的散斑与物象一起拍摄下来而得到的散斑图,可用来获得物体表面变形(位移)的信息。Archbold, Burch 和 Ennos 等人于 1969 年利用激光散斑法研究振动问题^[2],并且在 1970 年成功地进行物体变形的定量分析^[3,4]。1974 年, Evans 和 Boone 等人利用散斑相关原理测量断裂力学中的裂纹尖端张开位移(COD)和应力强度因子^[5-6]。由于傅里叶光学变换理论的发展与应用,可对散斑图进行全场分析,给出全场位移等值线条纹分布^[7]。错位(剪切)散斑干涉法首先是由 Leendertz 等人于 1973 年提出,并经 Y. Y. Hung (洪友仁)发展完善,从而实现了全场应变的直接测量^[8-9]。经过十几年的研究,散斑干涉技术衍生出多种方法,并与其它的光测技术相结合,在许多科学领域中得到应用。

散斑干涉技术之所以能在工程研究中得到广泛应用,主要是由于它有以下的优点:具有光学计量技术的非接触特点,测量精度高(为微米数量级);光路简单,不需复杂设备;能精确测定物体表面(若采用特殊手段,还可记录物体内部)任一点的变形数值与方向,也能得到全场的位移等值线条纹分布;此外,还可利用电子存储及电视监控技术,为自动化测量提供条件。

散斑干涉技术的最大困难在于干涉条纹的对比度过低,物体变形可测范围受散斑颗粒尺

寸、衍射晕尺度以及屏幕上可分辨的条纹密度的影响而难以扩大(一般在 6—150 μm 之间)。同时,由于散斑技术测量灵敏度过高,在实践中须注意消除物体的刚体位移的影响,以免造成测量误差。

一、散斑干涉计量术的基本原理与方法

受激光照射的物体在未变形前和受外力作用产生变形之后,用照相机进行两次曝光(也可将全息底片直接固定在物体表面某一处上),利用高分辨率的全息底片同时记录双曝光的物象及其散斑。设被照物体表面光波复振幅为 $H(\xi_1, \xi_2)$, 记录透镜孔径透射函数为 $A(r_1, r_2)$, 则在像平面(全息底片上)光波复振幅 $F(x_1, x_2)$ 有如下关系式:

$$F(x_1, x_2) = K \iiint H(\xi_1, \xi_2) A(r_1, r_2) \times \exp \left\{ ik \left[r_1 \left(\frac{\xi_1}{p} + \frac{x_1}{q} \right) + r_2 \left(\frac{\xi_2}{p} + \frac{x_2}{q} \right) \right] \right\} d\xi_1 d\xi_2 dr_1 dr_2,$$

其中 $K = e^{ik(p+q)}/pq$ 为常数, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, p, q 为物距和像距, $(\xi_1, \xi_2), (r_1, r_2)$ 和 (x_1, x_2) 分别为物平面、透镜面和像平面上的坐标。

在两次曝光之间,物体表面在加载前后的两个状态形成的两组随机分布的散斑都记录在同一张全息底片上,令 u, v 分别为 x_1, x_2 方向上的位移分量,则散斑光强分布为

$$I(x_1, x_2) = |F(x_1, x_2)|^2 + |F(x_1 + u, x_2 + v)|^2.$$

经显影处理后散斑图底片的光波复振幅透过率是曝光量的线性函数,包含着物体变形的信息。

位移和应变信息可用下面介绍的方法来提取。

1. 逐点分析法

如图 1 所示,用光斑尺寸约 1 mm 的激光束照射散斑图底片上待测点时,在远场屏幕上将出现明暗相间的平行条纹,称为杨氏条纹,其光强分布受平方余弦函数调制,见图 2。这是

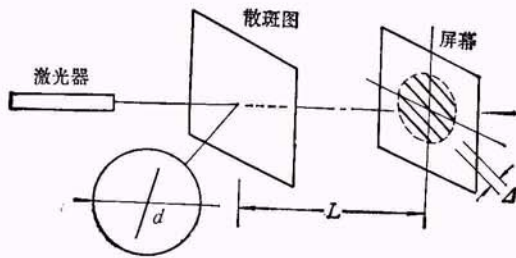


图 1 逐点分析法光路示意图

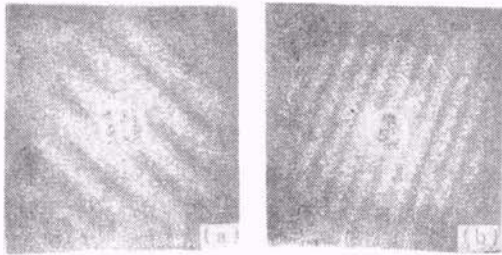


图 2 用逐点分析法得到的杨氏条纹

由于物体表面上任意一点在双曝光过程中,在全息底片上形成的一对亮斑的距离与方位和该点的变形有关。在逐点分析中,这一对亮斑相当于光学中的杨氏干涉实验的双孔。当激光束足够细时,散斑图底片上这一小范围内位移近似相等,在激光束范围内若干对散斑在远场进行统计叠加所形成的杨氏条纹,其法线方向就是位移(变形)方向,其条纹间距与物体测点在激光斑范围内的平均位移的关系式为

$$d = \lambda L / M \Delta,$$

式中 d 为物体表面测点的平均位移(变形), λ 为激光波长, L 为散斑图至屏幕的距离, M

为散斑图底片放大倍数, Δ 为杨氏条纹间距。

2. 全场分析法

全场分析法也称傅里叶光学变换法。如图 3 所示,将双曝光的散斑图放在相干平行光场中,经傅里叶透镜进行光学变换,则在变换平面上光强分布为

$$I(r_x, r_y) = 4 \cos^2 \times \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{f} \mathbf{r} \cdot \mathbf{d} \right) \right] \cdot I_s(r_x, r_y),$$

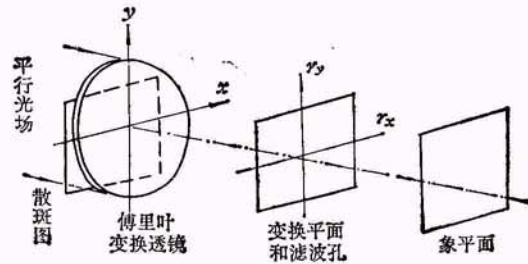


图 3 全场分析法光路示意图

其中 \mathbf{d} 为位移矢量, \mathbf{r} 为滤波调制向量, f 为傅里叶透镜焦距, $I_s(r_x, r_y)$ 为物体变形之前光波复振幅的傅里叶变换引起的光强。

在变换平面上通过滤波孔可在屏幕上观察到全场位移等值线条纹,其光强受余弦平方的函数所调制。可获得全场位移(变形)状态,参见图 4。

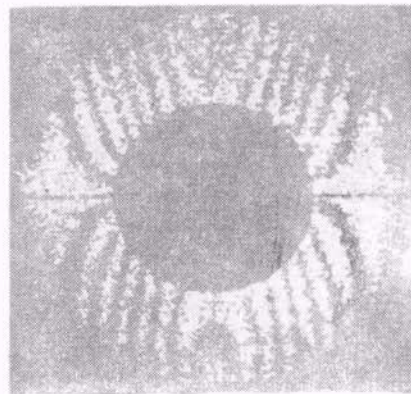


图 4 对经受压圆环全场垂直变形等值线条纹图

位移等值线条纹分布与滤波孔位置有关,若滤波孔在水平方向 r_x 上,当位移水平分量 $u = n\lambda f / r_x$ 时为亮条纹;滤波孔在垂直方向 r_y

上,即当位移垂直分量 $v = n\lambda f/r$, 时,可见亮条纹,其中 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 为条纹级数。

3. 错位(剪切)散斑干涉法

为了直接获得物体表面的应变场,从而得到工程研究感兴趣的应力状态,可在照相机成像透镜前,放置由平面平晶光学玻璃研磨成的上半部具有零点几度楔角的光楔,则物体上任意一点的反射光沿楔角偏离一微量,相当于数值微分的增量 Δx 或 Δy ,则双曝光散斑图底片在傅里叶光学变换系统中得到的是全场的应变等值线条纹。

当照明方向与拍摄方向一致时,可直接获得 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 。如果从不同角度照明,同时拍摄两张散斑图,对同一个测点来测量对应于不同照明方向下散斑图的条纹级数,可计算出 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 。当光楔沿着其平面轴线旋转 90° 时,按上述途径同样能获得垂直方向的偏导数 $\frac{\partial w}{\partial y}$ 和 $\frac{\partial u}{\partial y}$; 当照明光平面旋转 90° 时,同样也能得到 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 。这样,物体的离面位移 w 与面内位移 u, v 的关于坐标 x, y 的全部偏导数皆可测定,据此利用应力与应变关系可计算出平面应力。

二、散斑干涉计量术在水电工程中的应用

大型水电站具有投资大、周期长、经济效益高的特点,为保证工程质量和安全运行,往往需要进行结构模型试验。特别是拦河大坝等重要的水工建筑物,经常处于水文、地质条件复杂的地域,水库容量几亿甚至数百亿立方米,大坝可高达二百多米,万一出事,必然造成对国计民生极其严重的危害,因此必须使用多种手段,以便全面研究其应力、变形状态、超载安全度及抗滑抗倾覆稳定性等。

水工建筑物的结构模型试验研究通常采用电阻应变片和光测力学两种试验技术。散斑干涉计量术作为光测力学的一门新技术,一经出

现,很快就被应用于水电工程的大坝和地基变形分析,地下厂房的变形与失稳研究以及坝基的岩石地质力学抗滑稳定性的分析。实践证明,散斑干涉技术的逐点分析法特别适用于结构模型的变形与稳定研究,它具有精度高、设备简易的特点。

例如,广西某水电站的混凝土空腹溢流坝,建筑在地质构造复杂、基础岩性软弱、完整性较差的地基上,在坝踵处有两条较大的断层破碎带,对大坝的稳定性影响较大。在设计施工中,为了保证大坝安全,增设了深齿墙。为了解深齿墙的作用和断层破碎带对大坝坝体及基础的影响,采用了激光散斑干涉技术对坝体和地基的变形进行了分析研究。

为模拟断层破碎带,采用了不同弹性模量的环氧树脂和聚脂材料制成结构模型,并在其表面均匀地喷涂银粉以提高光反射率;使用机械加载装置按三角形分布模拟静水压力,注意控制外部荷载,使其满足双曝光散斑干涉法对结构模型的变形范围的要求;最后,在数据处理时按相似理论换算为结构物的实际数值。

试验研究结果表明,由于断层破碎带的存在,使该部位的垂直方向的变形显著增大,影响了附近坝基的变形分布,减弱了大坝抗倾覆的能力。设计施工中,在大坝前沿增设了混凝土铺盖和深齿墙,使之与坝基、坝体相互约束,从而减小了断层对坝体的有害影响(见图5)。通过试验研究,提出了在施工中应使深齿墙、铺盖与基础有钢筋紧密连接的方案,能使之连成整体,增强了大坝稳定性能,从而进一步提高了大坝的抗倾覆及抗滑稳定的能力。

大型地下结构(如隧洞、地下厂房等),其跨度和高度可达数十米,长度以百米计算,位于地下几十米乃至几百米深处,承受着巨大的地应力的作用,必须研究其应力状态及其变形规律,了解围岩破裂范围,以便采取相应的加固措施,增加孔洞的稳定性能。特别是水电站地下厂房结构群体,本身结构复杂,数目较多(包括主厂房、副厂房、母线廊道、主变开关室、尾水闸门井、运输交通洞等),同时又与数条大型地下压

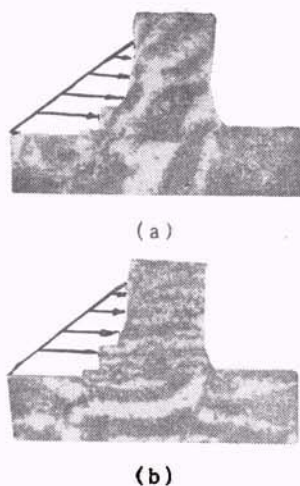


图5 某水电站空腹溢流坝受上游静水压力时的全场变形等值线条纹图
(a) 水平变形; (b) 垂直变形

力引水钢管及尾水管等相互交叉,再加上坝址处的地质条件一般都较复杂,存在着断层与岩石裂隙,岩体构造影响较大,因此,地下厂房结构群体的应力与变形状态都十分复杂,用单纯的数值计算方法不易获得全面确切的了解,必须辅以结构模型试验给与确定。以往在光测模型试验中一般只了解其应力分布,用散斑干涉技术很容易分析其变形规律,能为地下建筑物的稳定性研究提供实验依据。

例如,云南某水电站是国家重点大型混合式开发水电工程,地下厂房最大高度 38.4m,地质构造也相当复杂,厂区有数条断层破碎带,岩性软弱,给地下厂房围岩稳定性带来十分不利的影响,为了研究不同地应力场对地下厂房洞室群体和围岩的变形的影响,应用了激光散斑干涉计量技术。

试验中采用了石膏材料半整体结构模型,使用了双向对侧油压加载装置模拟地应力荷载,采用逐点分析法测出实际的变形数据,给设计施工部门提供依据。

研究表明,在地应力作用下,地下厂房围岩的变形与应力状态都十分复杂。一般说来,洞室顶拱中部附近,侧墙中部及底板与侧墙的交接部位,围岩变形较大,其最大变形位于顶拱中部附近并随地应力方向的变化而相应改

变。顶拱的变形随着其弦高比的增加有增大的趋势,随着垂直方向地应力与厂房主轴夹角的增加,围岩的垂直变形减小,水平变形增大,在双向地应力作用下,围岩一般处于压缩变形状态(向洞内方向的收敛变形),而在下游拱座附近产生向洞外方向的变形,符合地下洞室围岩的变形规律。由于开挖断面的影响,地下厂房洞体连接部附近变形较大,是结构薄弱部位,应考虑加固措施。厂区附近断层破碎带的存在,使围岩变形产生突变,恶化了地下建筑物的稳定性,必须引起足够重视。

由此可知,用散斑干涉技术研究地下结构的变形状态,再结合其它的试验方法(如用光弹性法研究应力分布,全息光弹性法与断裂力学相结合确定地下围岩的初始破裂范围,采用电阻应变计测量技术分析应力场与探索围岩在不同的粘着力和摩擦角时的抗滑稳定性等)和计算手段(包括用有限元法和边界元法进行计算等),就可以综合分析研究复杂的地下结构的变形与应力状态,为地下结构的稳定性研究提供依据,以便采取相应的工程加固措施,在保证地下建筑物安全的基础上,提高水电工程的经济效益。

三、散斑技术的发展前景

散斑技术是光测力学的一个组成部分。近代光学理论的不完善,测试技术水平的日益提高以及电子计算技术的广泛应用,为散斑干涉计量技术的深入发展提供了坚实的基础。

运用白光散斑技术,可以不用激光器就能快速地拍摄大面积工程结构的散斑图,使现场实测成为可能^[40]。将激光散斑技术和激光全息干涉技术相结合,综合各自的优点,能获得各种工程结构的三维位移场^[6]。采用错位(剪切)散斑干涉技术,现在已能定量测出平面应变场,从而直接得到各种工程结构的二维应力分布。应用近代光学理论和数理统计方法,可研究空间散斑的运动规律,揭示散斑的物理本质^[41]。

值得注意的是,近几年来发展起来的一种

“杂交法”，是将散斑实验技术与电子计算技术结合使用的方法。在工程研究中，经常需要同时了解工程结构的变形与应力状态。散斑干涉技术的逐点分析法得到的结构变形的数据，精度较高，可与数值计算方法相结合，来计算结构的应力。这是一种将力学模型与数学模型相结合，光测实验技术与计算机技术相结合的方法，是光测力学重大进展之一。它可充分利用实验技术易于模拟工程结构的边界条件与初始条件，模型材料的力学性能与实际相符，测量数据确实可靠等优点，又能充分发挥电子计算机数据处理速度快、精度高的长处，互相取长补短，从而能提高结构应力分析的速度与精度，节省工时，降低实验费用。

目前，利用散斑实验获得的变形数据进行应力计算时，可以采取以下四种方法：(1) 与有限元法相结合的方法。该法是选择合适的单元位移形函数，把通过散斑干涉测量的结构模型在模拟结构实际材料性能、边界条件以及外部荷载条件时得到的实际变形数据作为单元节点的位移值，利用有限元的应力矩阵，则可单独计算某个单元或某一区域的应力值。由于不必求解结构的整体刚度矩阵，故可实现用微机计算复杂的工程问题，从而可节约成本。对复杂的工程问题，能做到比单纯的有限元法计算更符合实际情况。(2) 与边界元法相结合的方法。边界元法仅要求对区域的边界进行离散化，能使问题简化，从而可以大大节省计算机的计算时间，对求解诸如隧洞一类的地下结构的应力分析尤其有利。结构模型的局部边界上的位移值，在实验上很容易由散斑干涉技术获得，以此作为边界条件，则可用边界元法很方便地求出该区域的内部特征值(如变形、应变应力或应力强度因子等)，具有足够的精度。(3) 与样条曲面函数法相结合的方法。它是通过样条曲面函数把有限测点的离散的位移数据仿样成连续的空间位移曲面函数，获得满足工程数值微分计算所需精度要求的全部位移值，则可进一步计算其应变与应力。该法特点是用少量的控制节点位移值即可获得全场的位移(变形)与应

物理

力分布，测量及计算的工作量较小。(4) 与线应变求解应力的方法相结合的方法。如同电阻应变片电测方法一样，为确定某点的应力，须确定该点沿着三个不同方向的应变(如 ϵ_{0° , ϵ_{45° , ϵ_{90°)，即可求出该点的主应变与主方向，进而可算该点的主应力、正应力与剪应力。而这一点的不同方向的线应变，可通过散斑干涉实验测出的各节点的位移分量差值在该方向的投影与两节点间基长之比求出。只要变形(位移)值具有足够的精度，其应力计算值则可满足工程要求。

为了保证实验数据应力计算的精度，减轻人工测量的工作量，提高实验数据的测量速度与精度，光测力学实验数据采集与处理自动化的课题成为当前重要的研究方向之一。目前的图象自动处理装置主要集中在处理光弹性条纹、全息干涉条纹和叠栅(moirè)条纹上，而对散斑条纹却很少问津，这主要是因为散斑条纹的背景噪声十分严重，信噪比很低，用光学和电学的方法进行预处理的难度较大，硬件、软件方面都有许多工作要做。正在研制的散斑图象自动处理装置是由微机控制的装置，其基本功能是：能按指令对散斑图上的给定区域以等间距或不同间距的形式自动扫描移动(或绕给定点进行扫描)，使用摄像机系统对每一测点衍射的杨氏条纹图象，自动进行不同部位的多次不同方位(纵向、横向及斜向)的重复扫描测量，将条纹间距数字化并进行电学滤波、平滑处理，用数值统计方法计算出条纹间距、方位角，由位移方向自动判别软件处理，从而获得该测点的位移分量并按给定坐标编码寄存。该装置能按选定的计算模式处理散斑实验数据，最终输出测点的坐标、变形(位移)、应变和应力值。装置还能实现人机对话，以便查询和修改。

可以相信，随着近代光学的发展和微电脑的广泛应用，实现光测实验数据采集与处理自动化将会在国民经济中取得明显的技术经济效益。

参 考 文 献

- [1] J. M. Burch, J. M. J. Tokavski, *Optica Acta*, 15

- (1968), 101.
- [2] E. Archbold et al., *Nature*, **222** (1969), 263.
- [3] E. Archbold et al., *Optica Acta*, **17** (1972), 253.
- [4] B. Eliasson, F. M. Mottier, *Proc. Opt. Soc. Am.*, **6** (1971), 559.
- [5] W. T. Evans et al., *Engi. Frac. Mech.*, **6** (1974), 735.
- [6] P. M. Boone, *Optica Acta*, **22-7** (1975), 579.
- [7] R. P. Khetan, F. P. Chiang, *Appl. Opt.*, **15-9** (1976), 2205.
- [8] J. A. Leendertz, J. N. Butters, *J. Phys. Engi. (Sci. Instrum.)*, **6**(1973), 1107.
- [9] Y. Y. Hung et al., *Appl. Opt.*, **14-3** (1975), 618.
- [10] C. Forno, *Opt. & Laser Tech.*, No. 16 (1975), 217.
- [11] 伍小平、何世平、李志超, *物理学报*, **29**(1980), 1142.

第五届国际离子束材料改性会议简讯

第五届国际离子束材料改性会议于1986年6月9日至13日在意大利西西里岛的卡塔尼亚举行。来自30个国家的300多名代表参加了大会。中国科学院上海冶金研究所、清华大学、北京师范大学和山东大学各有一名代表参加。

会议收到论文约340篇,内容涉及基本数据、金属注入、半导体注入、离子束非晶化、离子束混合、绝缘体注入和反应性离子刻蚀等七个方面。其中包括大会特邀报告26篇,一般报告20篇,其余的论文在会上均以大字报形式发表。中国学者在会上提出的报告近20

篇,其中一篇被安排为特邀报告。会议期间,对提出的论文进行了同行评审。通过的论文将在 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (B)* 的专刊上发表。

中国科学院上海冶金研究所的邹世昌被选入本届会议的国际顾问委员会委员。第六届国际会议将于1988年6月12日至17日在日本举行,会议主席是 Namba 教授;6月20日至24日,将在上海举行离子束技术和设备的讨论会,由邹世昌主持。

(柳百新)

国际等离子体科学与技术会议简讯

由中国力学学会和北京等离子体学会联合举办的国际等离子体科学与技术会议于1986年6月3日至7日在北京香山饭店举行。来自加拿大、捷克斯洛伐克、法国、联邦德国、日本、荷兰、波兰、新加坡、瑞士、英国、美国、苏联等十多个国家的代表40多人以及中国代表近百人出席了会议。

会议主席谈镐生教授致开幕词。在全体会议上,吴承康先生介绍了中国等离子体科学与技术研究发展概况。荷兰、苏联、美国、瑞士、中国、联邦德国代表分别作了有关电弧、气体放电、等离子体喷涂等方面的学术报告,引起大家很大的兴趣。

收入这次会议论文集的论文共117篇,其中包括综述性报告7篇,热(近平衡)等离子体方面的报告57篇,冷(非平衡)等离子体方面的报告53篇。

会议分四个组进行学术交流。A组交流的内容是热等离子体的基本过程,等离子体系统及其调节。B组的内容是在熔化、蒸发、冶炼、化学合成和热分解过程中的热等离子体行为的研究及有关诊断技术。C组的内容是冷等离子体过程及其调节以及冷等离子体诊断技术。D组的内容是在表面处理、刻蚀、沉积和聚合方面的冷等离子体研究。

会议期间还举办了小型等离子体仪器设备展览会。

会议情况表明,我国这些年来的等离子体科学技术在与经济建设密切联系方面有新的发展,但装置的技术水平,参数的测量和控制却有待进一步的提高,与等离子体过程有关的机理研究还需加强。

(洪明苑)